

О. Шин; В. Андрійчук, докт. техн. наук

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

СПЕКТРОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ФОТОСИНТЕЗНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Розроблено методику та проведено оцінку фотосинтезної ефективності ламп різного типу на основі їх спектрального розподілу випромінювання. Дана методика передбачає перехід від відносних одиниць до енергетичних. Проведено порівняльну оцінку фотосинтезної ефективності джерел світла, фотосинтезний потік яких записувався у вигляді суми потоків в окремих областях спектра. Показано, що поряд з високою енергетичною ефективністю володіють хорошою фітовіддачею лампи типу ДРІ1000-2, ДРІ2000-2М, ДНаТ-400 та ДРФ1000.

O. Shyn, V. Andriychuk

SPECTROMETRY METHOD OF ESTIMATION OF PHOTOSYNTHESIS EFFICIENCY OF LIGHT SOURCES

In the paper on the basis radiation spectral distribution the method of photosynthesis efficiency estimation has been developed. In the method the conversion of relative units into power ones has been proposed. The estimation has been carried out for different of lamps basing on a variety of criteria. It has been shown that, except of high energy efficiency, the lamps ДРІ1000-2, ДРІ2000-2М, ДНаТ-400 and ДРФ1000 are characterized by good photoefficiency.

Вступ

Проблема кількісної оцінки ефективності дії випромінювання з різним спектральним складом на ріст і розвиток рослин є важливою, оскільки вдалий підбір джерел випромінювання для світлокультури рослин закритого ґрунту пов'язаний з енерго- та матеріалоощадністю даного технологічного процесу. Згідно з [1-4], процес фотосинтезу органічних речовин у рослинах, в першу чергу, пов'язаний з наявністю в них хлорофілу. Він, поглинаючи енергію випромінювання, активно бере участь в окисно-відновних реакціях, в результаті яких з води і вуглекислого газу утворюються органічні речовини і кисень. Крім хлорофілу, в реакціях фотосинтезу беруть участь й інші пігменти, які присутні в рослинах (каротини, ксантофіли), а у червоних і синьо-зелених водоростях – фікобіліни і протеїди. Основна роль у фотосинтезі припадає на хлорофіл *a*, який має найнижчий рівень електронного збудження і знаходиться в мембранах хлоропластів у декількох формах, які відрізняються спектрами поглинання [1]. Складна багатоступенева система фотохімічних реакцій пояснює необхідність активного поглинання декількох різних квантів випромінювання для протікання фотосинтезу.

Метою даної роботи є оцінка фотосинтезної ефективності різного типу ламп на основі їх спектрального розподілу випромінювання.

Критерії оцінки фотосинтезної ефективності джерел світла

Існує ряд критеріїв для оцінки ефективності дії опромінення на рослини. Виходячи з фотохімічної природи фотосинтезу, його ефективність можна оцінити за виділенням кисню. Цей метод широко застосовується при фізіологічних дослідженнях рослин [5,6]. З точки зору виробничо-господарської діяльності, ефективність опромінення рослин оцінюється за кінцевим продуктом – масою плодів або коренеплодів, масою листків або загальною біомасою в залежності від того, яка частина рослин викликає господарський інтерес [7].

При оцінці біологічної цінності випромінювання в практиці вирощування рослин на закритому ґрунті виробилися три підходи:

1. Оцінка ефективності джерел випромінювання в системі фотосинтезних величин, в основі якої є фотосинтезний потік або фітопотік [8]. Визначення фітопотіку проводиться за формулою:

$$\Phi_{fc} = \int_{380}^{750} \varphi(\lambda) V_{fc}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де $\varphi(\lambda)$ - спектральна густина потоку випромінювання;

$V_{fc}(\lambda)$ - відносна спектральна фотосинтезна ефективність випромінювання.

Виходячи із закону про квантову еквівалентність поглинання ОВ фотосинтезними пігментами, $V_{fc}(\lambda)$ була визначена із спектру поглинання "середнього" зеленого листка [8,9]. За цією характеристикою було проведено оцінку ефективності джерел випромінювання для світлокультури рослин в [10-12].

2. Оцінка ефективності джерел за інтегральним потоком випромінювання, який припадає на видиму область, або потоком ФАР. У цьому випадку спектральна ефективність зображується П-подібною функцією, тобто зелений листок рослини замінено приймачем з неселективною чутливістю [10-12].

3. Для порівняльної оцінки ефективності джерел ОВ з різним спектральним складом використовують співвідношення між потоками квазімонохроматичного випромінювання видимої області [10,12]. Якщо вважати, що у фотосинтезі беруть участь, крім хлорофілу, каротиноїди та інші фотопігменти, то область ФАР можна розбити на зони у відповідності до спектрів поглинання цих пігментів. Згідно з ОСТ 46 140-83, „Випромінювання оптичне. Оцінка фотосинтезної ефективності. Терміни і визначення”, – $\Delta\lambda_1=380-500$ нм, $\Delta\lambda_2=500-600$ нм і $\Delta\lambda_3=600-720$ нм. Тоді фотосинтезний потік можна подати у вигляді складових:

$$\Phi_{fc} = \Phi_e \sum_{380}^{720} \bar{S}_i \cdot K_{\phi}(\lambda_i) = \Phi_e (\bar{S}_1 \cdot K_{\phi}(\lambda_1) + \bar{S}_2 \cdot K_{\phi}(\lambda_2) + \bar{S}_3 \cdot K_{\phi}(\lambda_3)), \quad (2)$$

де \bar{S}_i – усереднена відносна енергія випромінювання на i -й ділянці спектра $\Delta\lambda_i$ у відсотках до загального випромінювання ФАР;

$K_{\phi}(\lambda_i)$ – функція спектральної фотосинтезної ефективності випромінювання, яка, згідно з ОСТ 46 140-83, приймається: $K_{\phi}(\lambda_1)=0,6$; $K_{\phi}(\lambda_2)=0,4$; $K_{\phi}(\lambda_3)=1,00$.

Метод визначення фотосинтезного потоку та потоку ФАР

В усіх трьох підходах для оцінки фотосинтезної ефективності випромінювання необхідно знати спектральну густина потоку випромінювання $\varphi(\lambda)$. У більшості випадків ця величина записується у відносних одиницях, і тому використання її у розрахунках є неможливим. У зв'язку з цим була розроблена методика переходу $\varphi(\lambda)$ від відносних одиниць до ефективних або енергетичних та методика розрахунку фотосинтезного потоку, потоку ФАР і оцінки ККД випромінювання.

Для проведення розрахунків необхідно мати світловий потік та спектральний розподіл випромінювання джерела. Ці величини отримувалися експериментально у фотометричній лабораторії ВАТ «Ватра» за допомогою фотометричної кулі Тейлора з селеновим приймачем, спектральна чутливість якого нормалізована функцією відносної спектральної світлової ефективності випромінювання $V(\lambda)$ для денного зору.

Запишемо світловий потік ДВ

$$\Phi_c = m \cdot 680 \int_{380}^{720} \varphi(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

де m – масштабний коефіцієнт;

$\varphi(\lambda)$ – функція відносного спектрального розподілу випромінювання;

$V(\lambda)$ – відносна спектральна світлова ефективність монохроматичного випромінювання;

680 – світловий еквівалент потужності, лм/Вт.

Інтеграл $\int_{380}^{720} \varphi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$ дорівнює площі фігури, обмеженої графіком добутку

функцій $\varphi(\lambda) \cdot V(\lambda)$ та віссю довжин хвиль. Площа визначалась за спеціально розробленою програмою із графіків, які заносилися в базу даних ЕОМ

$$S_c = \int_{380}^{720} \varphi(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda.$$

За виміряним світловим потоком та визначеній площі S_c знаходили масштабний коефіцієнт m , Вт/м² за формулою

$$m = \frac{\Phi_c}{680 \int_{380}^{720} \varphi(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} = \frac{\Phi_c}{680 \cdot S_c}. \quad (4)$$

Повний потік випромінювання, який припадає на видиму область спектра Φ , Вт, визначався через коефіцієнт m та інтеграл $\int_{380}^{720} \varphi(\lambda) d\lambda$, який дорівнює площі під графіком $\varphi(\lambda)$ для відповідного джерела за формулою

$$\Phi = m \cdot \int_{380}^{720} \varphi(\lambda) d\lambda = m \cdot S, \quad S = \int_{380}^{720} \varphi(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Фотосинтезний потік або фітопотік Φ_{fc} , фіт або Вт визначався як добуток

$$\Phi_{fc} = m \cdot \int_{380}^{720} \varphi(\lambda) \cdot V_{fc}(\lambda) d\lambda = m \cdot S_{fc}, \quad S_{fc} = \int_{380}^{720} \varphi(\lambda) \cdot V_{fc}(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

де $V_{fc}(\lambda)$ – відносна спектральна фотосинтезна ефективність ОВ;

S_{fc} – площа під графіком добутку функцій $V_{fc}(\lambda) \cdot \varphi(\lambda)$.

Коефіцієнт корисної дії джерела для світлового та фотосинтезного потоків визначалися згідно з формулами

$$\eta_c = \frac{\Phi_c}{\Phi} = \frac{S_c}{S}; \quad (7)$$

$$\eta_{fc} = \frac{\Phi_{fc}}{\Phi} = \frac{S_{fc}}{S}. \quad (8)$$

При знаходженні масштабного коефіцієнта, повного потоку випромінювання та фітопотіку необхідно побудувати графіки функцій $\varphi(\lambda)$, $\varphi(\lambda) \cdot V_{fc}(\lambda)$ і виміряти площу під ними. Якщо це робити графічно вручну, то це забирає багато часу і вимагає додаткових зусиль. Враховуючи також те, що для порівняльної характеристики фотосинтезної ефективності різних джерел випромінювання з метою створення енергоощадних пристроїв необхідна інформація для кожного із них, то об'єм робіт та затрати часу різко зростають, а точність визначення параметрів є низькою. Точність і швидкість розрахунків можна підвищити, якщо проводити його на комп'ютері. Для цього розроблено спеціальну програму, алгоритм розрахунку за якою наведено нижче [13].

Алгоритм розрахунку фотосинтезної ефективності ДВ:

- 1) виходячи із експериментальних спектральних вимірювань або за допомогою сканера, якщо функції спектрального розподілу наведені графічно, отримуємо на екрані дисплея графіки $\varphi(\lambda)$, $V(\lambda)$, $V_{fc}(\lambda)$;
- 2) зафарбовуємо площу фігури, обмежену графіком та віссю довжин хвиль, певним кольором;
- 3) графіки $\varphi(\lambda)$, $V(\lambda)$, $V_{fc}(\lambda)$ представляємо у вигляді таблиць із заданим кроком $\Delta\lambda$;
- 4) визначаємо добутки функцій $\varphi(\lambda) \cdot V(\lambda)$, $\varphi(\lambda) \cdot V_{fc}(\lambda)$ і знаходимо площі S_c , S_{fc} та S ;
- 5) визначаємо масштабний коефіцієнт площі m ;
- 6) знаходимо Φ , Φ_{fc} та коефіцієнт корисної дії джерела для світлового та фотосинтезного потоків.

Також проводилася порівняльна оцінка фотосинтезної ефективності джерел випромінювання, фотосинтезний потік яких записувався у вигляді суми (2) потоків в окремих областях спектра, визначених згідно з ОСТ 46 140-83. Це є важливим при виборі джерел випромінювання для дослідження впливу різних пігментів на фотосинтез та ріст і розвиток рослин.

Представлена в ОСТ 46 140-83 наближена формула визначення і-тої складової фотосинтезного потоку (2)

$$\Phi_{fc_i} = \Phi_e \cdot S_i \cdot K_{\phi}(\Delta\lambda_i) \quad (9)$$

була замінена більш точною формулою

$$\Phi_{fc_i} = m \cdot \int_{\lambda_{i-1}}^{\lambda_i} \varphi(\lambda) \cdot V_{fc}(\lambda) d\lambda = m \cdot S_{fc_i}, \quad (10)$$

де S_{fc_i} – площа під графіком добутку функцій $\varphi(\lambda) \cdot V_{fc}(\lambda)$ на ділянці спектра $(\lambda_{i-1}, \lambda_i)$;

m – масштабний коефіцієнт площі, визначений згідно з (4).

Розрахунок Φ_{fc} проводився за вище описаною програмою для виділеної спектральної області $(\lambda_{i-1}, \lambda_i)$.

Результати розрахунку

Результати розрахунків основних параметрів фотобіологічної цінності джерел випромінювання, отримані згідно з формулами (5–10), наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри фотосинтезної ефективності джерел випромінювання

Тип джерела випромінювання	Світловий потік, клм	Повний потік випромінювання, Вт	Фітопотік, фіт	Частина потоку ФАР у спектральній області, %			Коефіцієнт корисної дії, %		Фітовіддача джерела, фіт/Вт	Світловіддача джерела, лм/Вт	Віддача джерела в області ФАР
				$\Delta\lambda_1 = 380-500$ нм	$\Delta\lambda_2 = 500-600$ нм	$\Delta\lambda_3 = 600-720$ нм	фото-синтезної	світлової			
ДБРНаТ-100	7	20,6	10,2	9	58	33	49,3	49,9	0,102	70	0,21
ДРЛФ-400	20	52,9	27,9	19	48	33	52,2	55,6	0,070	50	0,13
ДНаТ-400	47,5	106,9	56,1	9	64	27	52,5	65,3	0,140	118,8	0,27
ДРФ-1000	72	236,8	106,3	30	55	15	44,9	44,7	0,106	72	0,24
ДРИ-1000-2	70	273,6	134,7	33	50	17	49,2	37,6	0,134	70	0,27

ДРИ-2000-2	190	476	234	33	50	17	49,2	58,7	0,117	95	0,24
ДРИ-2000-2М	190	665,2	352,7	29	38	33	53,1	42,2	0,176	95	0,33
ДРЛ-400	24	147,5	75,1	18	44	38	50,9	23,9	0,188	60	0,37
ДНаС-340	30	109,2	56,6	9	64	27	51,8	32,1	0,166	88,2	0,32
КГ-2000	55	194,6	89,5	20	30	50	46,0	41,6	0,045	27,5	0,10

Висновки

Із наведених досліджень випливає, що розглянуті вище підходи оцінки ефективності джерел світла для рослинництва закритого ґрунту не протирічають один одному, а навпаки, доповнюють і дають близькі за величиною результати. Тому для оцінки енергетичної ефективності ламп, які використовуються у світлокультурі рослин, ці підходи можна вважати еквівалентними.

Із наведених табличних даних випливає, що до найбільш перспективних джерел, які поряд з високою енергетичною ефективністю володіють хорошою фітотвідачею, є дугові металогалогенні лампи типу ДРИ1000-2, ДРИ2000-2М, натрієва лампа ДНаТ-400 та лампи ДРФ1000.

Література

1. Кахнович Л.В. Фотосинтетический аппарат и световой режим. - Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 1980. — 144 с.
2. Мокронос А.Т., Гавриленко В.Ф. Фотосинтез: Физиолого-экологические и биохимические аспекты. - М.: Изд-во МГУ, 1992. - 320с.
3. Беляева О.Б., Литвин Ф.Ф. Фотобиосинтез хлорофила. - М.: Изд-во МГУ, 1989. - 103с.
4. Вознесенская Е.В. Структура фотосинтетического аппарата// РАН. Физ растений. - 1996. - Т.43, № 3. - С.126-131.
5. Полевой В.В., Саламатова Т.С. Физиология роста и развития растений. - Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1991. - 240с.
6. Фридлянд Л.Е., Калер В.Л., Гиллер Ю.Е., Калмыкова В.Г., Каспарова И.В. Оценка внутренних параметров фотосинтетического аппарата по кривым CO_2 -газообмена листа хлопчатника// Физиология растений. - 1988. - Т.35, вып.1. - С.24-29.
7. Фотосинтез, продукционный процесс и продуктивность растений / Б.И.Гуляев, И.И.Рожко, А.Д.Рогаченко. - К.: Наукова думка, 1989. - 152с.
8. Шувалов В.А. Первичные преобразования световой энергии при фотосинтезе. - М.: Наука, 1990. - 256с.
9. Мерзляк М.Н. Пигменты, оптика листа и состояние растений. // Соросовский Образовательный Журнал. - 1998. - № 4 - С.19-24.
10. Жилинский Ю.М., Кумин В.Д. Электрическое освещение и облучение. — М.: Колос, 1982. - 272с.
11. Применение оптического излучения в сельском хозяйстве: Межвуз. сб. науч. тр. — Саранск: Изд. Мордов. ун-та, 1985. — 148с.
12. Сарычев Г.С. Облучательные светотехнические установки. - М.: Энергоиздат, 1992. — 240с.
13. Андрійчук В.А., Дворницький В.М., Костик Л.М. Автоматизований метод визначення фотосинтезного потоку та коефіцієнта корисної дії джерела випромінювання // Вісник Тернопільського приладобудівного інституту. - 1996. - № 2. - С.116-121.

Одержано 02.04.2008 р.